



MESTRADO
MÉTODOS QUANTITATIVOS PARA A DECISÃO
ECONÓMICA E EMPRESARIAL

TRABALHO FINAL DE MESTRADO
DISSERTAÇÃO

A INFLUÊNCIA DAS ENCOMENDAS CRUZADAS EM
GESTÃO DE STOCKS: UMA ANÁLISE UTILIZANDO
SIMULAÇÃO

JOANA FRIAS LUÍS

OUTUBRO 2017



MESTRADO EM
MÉTODOS QUANTITATIVOS PARA A DECISÃO
ECONÓMICA E EMPRESARIAL

TRABALHO FINAL DE MESTRADO
DISSERTAÇÃO

A INFLUÊNCIA DAS ENCOMENDAS CRUZADAS EM
GESTÃO DE *STOCKS*: UMA ANÁLISE UTILIZANDO A
SIMULAÇÃO

JOANA FRIAS LUÍS

ORIENTAÇÃO:

PROFESSOR DOUTOR JOSÉ ÁLVARO DA CRUZ DE ASSIS
LOPES

PROFESSORA DOUTORA LÍGIA DUQUE BATISTA AMADO

OUTUBRO 2017

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Doutor José Álvaro Assis Lopes, por, ao longo de todos estes anos, me ter passado todo o conhecimento possível, pelo apoio, dedicação e motivação, sem os quais não teria sido possível a concretização deste trabalho.

À minha orientadora, Prof. Doutora Lígia Duque Batista Amado, pelo incentivo e empenho mostrados ao longo de todo o percurso na realização deste trabalho.

Aos meus pais, pelo amor e apoio incondicional, pela dedicação, pelo encorajamento e pelos dias sem mim, um enorme obrigada.

À minha família e aos meus amigos, que se mostraram incomparáveis no estímulo da minha felicidade e do meu sucesso.

RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma abordagem de natureza empírica ao estudo da influência do cruzamento de encomendas nas políticas de gestão de *stocks* (o ponto de encomenda e a revisão cíclica). A análise salienta a importância deste tipo de encomendas, descrevendo as características operacionais que mais contribuem para o seu aparecimento, bem como as limitações que os modelos analíticos apresentam, nomeadamente o facto não considerarem a existência de encomendas cruzadas.

Como forma de avaliar o impacto das aproximações, emprega-se a simulação e, particularmente, a otimização em simulação, recorrendo a um algoritmo genético, evidenciando a importância desta técnica na caracterização de variáveis de gestão.

Termina-se com a análise das variáveis consideradas como ótimas para cada uma das abordagens e retiram-se as principais conclusões.

Palavras-chave: gestão de *stocks*; política do ponto de encomenda; política da revisão cíclica; encomendas cruzadas; simulação; otimização; algoritmo genético; metodologia.

ABSTRACT

In this research project it is presented an empirical approach of the study of the influence of order crossovers on the stock management policies (reorder point policy and periodic review policy). The analysis emphasizes the importance of this type of orders, describing not only the operational characteristics that contribute most to its occurrence, but also the limitations that the analytical models show, namely, not considering the existence of order crossovers.

As a way of evaluating the impact of the approximations, the simulation and, particularly, the optimization in simulation are employed, using a genetic algorithm, evidencing the importance of this technique in the characterization of the parameters.

The parameters considered as optimal obtained for each of the approaches are then analyzed and the main conclusions are drawn.

Keywords: stocks management; reorder point policy; periodic review policy; order crossovers; simulation; optimization; genetic algorithms; methodology.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO E METODOLOGIA.....	1
1.1. Introdução	1
1.2. Metodologia	4
2. O FENÓMENO DAS ENCOMENDAS CRUZADAS.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
4. AS POLÍTICAS DE GESTÃO DE <i>STOCKS</i> MAIS CLÁSSICAS	10
4.1. Dados do Problema	13
4.2. Metodologia dos Modelos de Simulação	15
5. SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO.....	16
5.1. Modelos de Simulação	16
5.2. Otimização	19
5.3. Otimização em Simulação.....	19
6. ANÁLISE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES	20
6.1. Análise de Resultados	20
6.2. Conclusões	31
7. FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	32
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
9. ANEXOS.....	39
Anexo 1: Estrutura da política de Ponto de Encomenda.....	39
Anexo 2: Estrutura da política de Revisão Cíclica.....	39
Anexo 3: Algoritmo para os Modelos de Otimização Analítica (PE).....	40
Anexo 4: Algoritmo para os Modelos de Otimização Analítica (RC).....	40
Anexo 5: Descrição detalhada dos blocos de simulação.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Metodologia, adaptado de Law (2003, 2014)	4
Figura 2: Encomendas cruzadas	6
Figura 3: Análise de Pareto	13
Figura 4: Bloco <i>Plotter</i>	16

Figura 5: Blocos <i>Constant</i>	17
Figura 6: Bloco <i>Decision</i>	17
Figura 7: Bloco <i>Pulse</i>	19

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Política de Ponto de Encomenda	11
Gráfico 2: Política de Revisão Cíclica.....	11
Gráfico 3: Relação entre σ_L e TRC	27
Gráfico 4: Relação entre σ_{L+R} e TRC	27
Gráfico 5: Valores de Q nos Cenários I a V da Política de Ponto de Encomenda	29
Gráfico 6: Valores de s nos Cenários I a V da Política de Ponto de Encomenda	30

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros do item	14
Tabela 2: Custos do item	14
Tabela 3: Características paramétricas da procura durante o tempo de entrega.....	15
Tabela 4: Variáveis da política de PE (Aproximação Analítica).....	23
Tabela 5: Variáveis da política de RC (Aproximação Analítica).....	23
Tabela 6: Variáveis da política de PE (Otimização Analítica).....	24
Tabela 7: Variáveis da política de RC (Otimização Analítica)	24
Tabela 8: Variáveis e custo total da política de PE (Aproximação Analítica)	24
Tabela 9: Variáveis e custo total da política de RC (Aproximação Analítica).....	24
Tabela 10: Variáveis e custo total da política de PE (Otimização Analítica).....	25
Tabela 11: Variáveis e custo total da política de RC (Otimização Analítica).....	25
Tabela 12: Variáveis e custo total da política de PE (Otimização em Simulação)	25
Tabela 13: Variáveis e custo total da política de RC (Otimização em Simulação).....	25
Tabela 14: Impacto de variações de σ no valor de σ_L	26
Tabela 15: Proximidade das variáveis das políticas para o Cenário I	28

1. INTRODUÇÃO E METODOLOGIA

1.1. Introdução

Este trabalho apresenta uma abordagem empírica a um tema de crucial importância no que respeita a gestão de materiais, relevando o rigor que deverá haver na aproximação à realidade dos modelos que sustentam os procedimentos em gestão de *stocks*. Esta matéria exigirá ainda, para além do que é estudado neste trabalho, um conjunto aprofundado de análises que permitam conduzir a modelos mais ajustados a situações reais. Nesse sentido, justifica-se, por exemplo, definir e concretizar caminhos que permitam, de forma expedita, determinar a probabilidade de existência de encomendas cruzadas, bem como determinar quais as correções a serem efetuadas na variância do tempo de entrega de encomendas num conjunto mais vasto de distribuições estatísticas e de políticas de gestão, entre outras situações.

Atualmente, para as diversas etapas do processo de decisão de uma empresa, é cada vez mais importante o acesso a informação o mais precisa, atualizada e fidedigna possível. Contudo, há um leque de variáveis que o gestor não pode, nem consegue, controlar ou prever. São exemplos disto, a procura de um determinado bem e o respetivo tempo de entrega aquando da sua encomenda. Uma pequena – e inesperada – variação da procura e/ou dos tempos de entrega, pode levar à rotura de stock (níveis de stock negativo) originando vendas perdidas ou diferidas, com consequentes custos adicionais para a empresa. Como tal, o gestor deve escolher e implementar uma política de gestão de *stocks* que se adapte às características dos vários produtos.

Neste trabalho recorre-se às políticas de gestão de *stocks* mais clássicas – política de Ponto de Encomenda (PE) e política de Revisão Cíclica (RC) – para estudar o impacto da variabilidade do tempo de entrega na determinação das variáveis das políticas acima

mencionadas. Para fazer este estudo, são desenvolvidos modelos que retratam essas políticas recorrendo a um *software* de simulação, onde é possível analisar o comportamento das variáveis de gestão, fazendo apenas alterações nos *inputs* das características do tempo de entrega, sendo este o parâmetro que condiciona de forma determinante a existência, ou não, de cruzamento de encomendas.

São ainda de destacar os inúmeros artigos de natureza científica dedicados à divulgação de novas aplicações ou a progressos na conceção dos modelos de gestão utilizados neste trabalho, o que demonstra a importância da sua aplicação. São disso exemplo o *International Journal of Inventory Research* e o *International Journal of Logistics Management*.

Poder-se-á pôr em causa a importância da escolha deste tema em face das mais recentes evoluções da filosofia *JIT* (*Just In Time*) que recomenda, entre outros objetivos, a eliminação ou redução substancial de *stocks*. Importa referir que apenas se deve optar por esta política se a mesma se mostrar mais económica, mas, geralmente, esta é utilizada como combinação híbrida com as políticas mais clássicas.

A existência do *JIT* poderá encobrir problemas de funcionamento menos óbvios ou que aparentam menor importância (Stevenson, 2017). Note-se, no entanto, que a aplicação desta filosofia não é isenta de riscos, nomeadamente a circunstância de funcionar menos adequadamente em situações onde a procura é mais variável. Esta situação conduz à utilização maioritariamente generalizada dos modelos descritos neste trabalho e que são aplicados na gestão de produtos de natureza comercial com procura independente (Chopra & Meindl, 2016).

É ainda de salientar que as organizações onde se estabeleceu a filosofia do *JIT* utilizam muitas vezes, e em paralelo, sistemas mais clássicos de gestão de *stocks*

(designados por *Just In Case*), como forma de colmatar o risco já mencionado. Importa ainda mencionar que grande parte das pequenas e médias empresas não possuem, entre outras características, poder negocial suficiente para impor as condições que são exigidas pelo *JIT*, uma vez que as particularidades do volume e da frequência da procura não permitem que sejam consideradas como prioritárias pelos fornecedores. Este facto impossibilita o estabelecimento de contratos de garantia de abastecimento estritos, optando, neste caso, pela utilização de métodos de gestão clássicos para os seus produtos.

No primeiro capítulo introduz-se o tema em estudo, descrevendo a sua importância e explica-se a abordagem metodológica a seguir.

No segundo capítulo é feita uma explicação mais detalhada do que são as encomendas cruzadas, explicitando ainda algumas possíveis causas.

Posteriormente, no capítulo três, faz-se a revisão bibliográfica relativa à informação até agora publicada e desenvolvida sobre o tema em questão.

No capítulo quatro descrevem-se as políticas de gestão de *stocks*, apresentam-se os dados e faz-se a descrição da metodologia implementada no que respeita à simulação e otimização em simulação.

No capítulo seguinte, é feita uma descrição dos blocos constituintes dos dois modelos, PE e RC, explicando também as temáticas mais práticas do trabalho: simulação, otimização e otimização em simulação.

Os resultados da aplicação de modelos analíticos, de simulação e de otimização são apresentados e analisados no sexto capítulo, expondo-se ainda as principais conclusões.

O sétimo capítulo é dedicado a algumas reflexões sobre desenvolvimentos futuros.

1.2. Metodologia

A metodologia seguida neste trabalho é a mesma que foi desenvolvida por Law (2003, 2014), que se baseia num processo de sete etapas, tal como podemos observar na figura abaixo.



Figura 1: Metodologia, adaptado de Law (2003, 2014)

Começa-se com a formulação do problema. Resumidamente, é o momento em que se define o objetivo de estudo do trabalho, as questões que necessitam de ser respondidas e todos os restantes detalhes, tanto no que se refere ao modelo a ser desenvolvido, como ao tempo que cada tarefa acarreta.

Recorre-se depois à pesquisa bibliográfica para fazer um levantamento das principais teorias e modelos desenvolvidos até ao momento presente.

Prepara-se então o modelo conceptual, fazendo a recolha de informação (neste caso, recorre-se a dados fictícios), decidindo que distribuições estatísticas utilizar e que hipóteses se devem considerar.

A partir da estrutura conceptual, um modelo operacional é desenvolvido e testado com recurso às ferramentas de simulação e otimização. Durante este processo, desenha-

se, programa-se e analisa-se o modelo operacional no *software* de simulação escolhido. Na construção do modelo operacional, deve ter-se sempre em atenção a verificação, validação e credibilidade do mesmo, de forma a verificar se é uma boa representação da realidade.

Segue-se a fase de experimentação, que consiste nos testes de verificação de funcionalidade do modelo. Uma vez que o programa esteja operacional e corra sem problemas, seleciona-se o período de aquecimento (*warm up period*) para a estabilização dos resultados bem como a duração do período de experimentação no qual o mesmo irá correr. Assim que esta etapa esteja concluída, procede-se à realização das *runs* (corridas) do modelo no *software*.

Finalmente, recolhem-se e analisam-se os resultados e são retiradas as principais conclusões.

2. O FENÓMENO DAS ENCOMENDAS CRUZADAS

A necessidade de satisfazer atempadamente a procura de um determinado bem é um aspeto crucial para o sucesso de qualquer empresa. Como tal, a previsão e controlo do *stock* são indispensáveis. O aumento da procura de um bem leva a que o gestor encomende mais quantidade e um maior número de vezes – ao mesmo ou a diferentes fornecedores – possibilitando assim a ocorrência de encomendas cruzadas, sobretudo quando o tempo de aprovisionamento é muito variável. Este acontecimento traduz-se na chegada das encomendas ao destinatário por ordem diferente daquela pela qual foram encomendadas, conforme ilustrado na Figura 2.

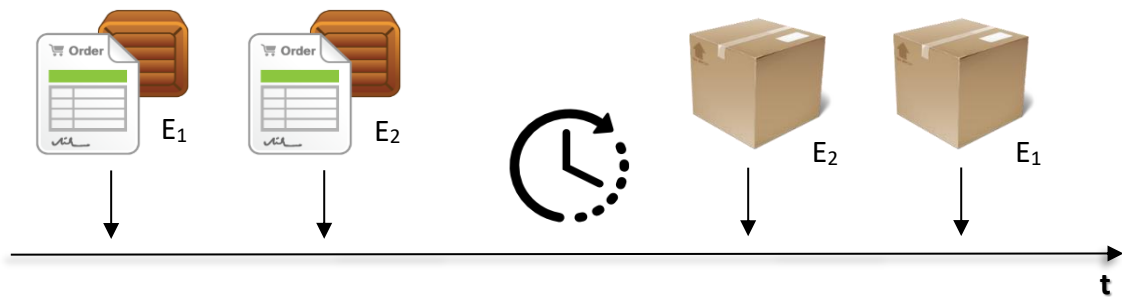


Figura 2: Encomendas cruzadas

Riezebos (2006) introduz três tipos de encomendas cruzadas: variáveis, expectáveis e gerais. As encomendas cruzadas variáveis (*random order crossovers*) são consequência da hipótese de que os tempos de entrega são estáticos e estocásticos, as encomendas cruzadas expectáveis (*expected order crossovers*) são aquelas que resultam de tempos de entrega dinâmicos e determinísticos e as encomendas cruzadas gerais (*general order crossovers*) são aquelas que admitem que os tempos de entrega são, ao mesmo tempo, dinâmicos e estocásticos.

As causas do cruzamento de encomendas são diversas. Saldanha et al. (2009) estudam as questões marítimas, as questões de importação/alfândega são levantadas por Jula & Leachman (2011) e depois por Leachman & Jula (2012); a confiabilidade do “trânsito” de mercadoria é estudado por Caplice & Kalkanici (2012) e mais tarde por Kalkanici & Caplice (2012); a questão dos contentores foi abordada por Fransoo & Lee (2012); a escolha de modos de transporte mais variáveis, a quantidade encomendada mais reduzida (e mais frequente) e a recorrência a fornecedores globais em vez de nacionais foram questões estudadas por Srinivasan et al. (2011).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A bibliografia existente sobre o tema em análise recorre tanto a modelos determinísticos como a estocásticos. Os primeiros não consideram a possibilidade de tanto a procura como o tempo de entrega serem incertos e variáveis nem a existência de encomendas cruzadas. A principal razão para a não consideração destas situações é a simplicidade consequente no cálculo das variáveis. Porém, esta decisão acarreta consequências negativas, de que são exemplo as aproximações incorretas dessas mesmas variáveis, ou até mesmo a sobrestimação dos valores dos tempos de entrega e, conseqüentemente, a sobrestimação dos custos de *stocks* associados, como refere Bischak et al. (2013). As questões levantadas anteriormente põem em causa a confiança dos resultados e análises daí provenientes, bem como a sua adaptação à realidade. No que respeita aos modelos clássicos e probabilísticos (estocásticos), Hadley & Whitin (1963), e mais tarde Kaplan (1970), defendem que se o tempo de entrega for ao mesmo tempo estático e estocástico, as hipóteses de que as encomendas não se cruzam e de que os tempos de entrega são independentes são conflituosas. Riezebos (2006) chama à atenção de que se relaxarmos uma destas hipóteses, há um acréscimo de dificuldade aquando da determinação da estimativa do nível apropriado de *stock* em mão.

O modelo desenvolvido por Kaplan (1970) assume que dois pedidos encomendados em alturas distintas, e que cheguem ao mesmo tempo ao destino, não são considerados como encomendas cruzadas, logo a questão da ocorrência de cruzamento de encomendas não é tida em conta.

Outros autores que também não consideram a possibilidade da existência de encomendas cruzadas na construção dos seus modelos são Tijms & Groenevelt (1984), Bagchi et al. (1986), Eppen & Martin (1988), Zheng (1992), Silver et al. (1998) e

Terpelmeier (2011). Adicionalmente, Washburn (1973), Liberatore (1979), Sphicas (1982), Nasri (1986) e He (1992) inibem também a sua ocorrência e assumem ainda que não há lugar a *backorders*. Por outro lado, Kaplan (1970) e Zipkin (1986) constroem os seus modelos baseados na propriedade de dependência dos tempos de entrega das encomendas. Song (1994), Song & Zipkin (1996) e Zipkin (2000) não consideram o cruzamento de encomendas, uma vez que assumem que as encomendas são recebidas sequencialmente e Sphicas & Nasri (1984) e He et al. (2005) admitem que as distribuições dos tempos de entrega são limitadas (*bounded*) ou truncadas.

No modelo desenvolvido por He et al. (1998) considera-se que a procura é constante e que os tempos de entrega são independentes e identicamente distribuídos e uniformes, tal como assumido por Ramasesh et al. (1991). He et al. (1998) dividem o seu estudo sobrestimam o custo total e a quantidade a encomendar, quando a variabilidade dos valores dos tempos de entrega é elevada. No entanto, quando é definido um modelo de ciclos múltiplos (*multicycle*), onde dão uma descrição apropriada do cruzamento de encomendas, o resultado é uma aproximação contígua dos valores ótimos para os cenários estudados pelos autores (He et al., 1998).

Alguns outros avanços foram alcançados por Riezebos & Gaalman (2006), que desenvolvem um modelo que considera encomendas cruzadas expectáveis, deduzindo assim uma política de encomendas geral a partir da alteração de um problema de programação estocástica dinâmica (esta técnica de resolução de problemas foi também abordada por Hadley & Whitin (1963) e Kaplan (1970)).

Hayya et al. (2010) melhoram os modelos desenvolvidos por Hayya et al. (2009), assumindo a possibilidade de ocorrência de encomendas cruzadas num modelo de redução da variação dos tempos de entrega e recorrendo a tempos de entrega

exponenciais. Adicionalmente, Hayya et al. (2010) não incluem o custo da redução do tempo de entrega no seu modelo, e verificam se as poupanças alcançadas com a redução dos tempos de entrega cobrem o custo dessa mesma redução (custo-benefício).

O modelo desenvolvido por Bischak et al. (2013) assume a possibilidade de procura estocástica e/ou tempos de entrega variáveis, tal como introduzido primeiramente por Hayya et al. (2008, 2010). Hayya et al. (2008) introduzem os tempos de entrega efetivos que consistem no intervalo de tempo entre o despoletar da primeira encomenda e a receção da primeira encomenda e mostram que a utilização de tempos de entrega efetivos, nos modelos analíticos, tem como vantagens tornar os modelos desenvolvidos com base neste conceito mais parcimoniosos e permitir ainda uma maior aproximação às variáveis ótimas das políticas de *stocks*, conduzindo assim a uma minimização de custos efetiva. Outro avanço deste modelo é a consideração da possibilidade de autocorrelação entre os tempos de entrega.

Wensing & Kuhn (2015) para além de demonstrarem como facilmente adaptam as abordagens clássicas ao estudo do cruzamento de encomendas, aprofundam também o conceito dos tempos de entrega efetivos para melhor descrever o processo de chegada das encomendas, conduzindo a uma diminuição da variação existente nos valores dos tempos de entrega. Adicionalmente, estudam o impacto das encomendas cruzadas no processo de encomenda e na eficiência dos sistemas de revisão cíclica, quando se consideram tempos de entrega independentes.

Warburton & Stratton (2002) mostram a importância e o impacto que erros na previsão da procura podem ter na produção e, conseqüentemente, na oferta de produtos. Este estudo é mais tarde desenvolvido por Disney et al. (2016) que dão um avanço importante, uma vez que consideram a existência de incerteza, tanto na procura como nos

tempos de entrega, aquando da determinação dos níveis do *stock* de segurança e que a solução gerada por Warburton & Stratton (2002) não admitia. O modelo desenvolvido por Disney et al. (2016) considera ainda a existência de encomendas cruzadas e a possível correlação entre os níveis de *stock* e as ordens de encomenda. Para além do que já foi mencionado, contribuem ainda para uma melhor definição da distribuição das encomendas feitas quando os tempos de entrega são incertos, situação que é frequente no mundo real.

4. AS POLÍTICAS DE GESTÃO DE STOCKS MAIS CLÁSSICAS

Segundo o estudo feito por Hadley & Whitin (1963), e mais tarde Kaplan (1970), sendo a procura considerada uma variável aleatória, a probabilidade de sobrevalorizar a quantidade a encomendar era baixa e, como tal, recorria-se geralmente à política de Ponto de Encomenda. Contudo, muitas vezes não se tornava económico adotar esta política (devido a dificuldades administrativas), preferindo-se, alternativamente, a política de Revisão Cíclica. Apesar de toda a evolução tecnológica e informática que surgiu desde a publicação destes trabalhos, os modelos de Ponto de Encomenda e de Revisão Cíclica (com diversas variantes) continuaram a ser usados até aos nossos dias.

Enquanto que, na política de Ponto de Encomenda, uma encomenda de Q unidades fixas é gerada quando o *stock* alcança o nível s (mais conhecido por ponto de encomenda), na política de Revisão Cíclica, o que é fixo é o ciclo (intervalo de tempo entre duas revisões) e a quantidade a encomendar é variável e a suficiente para que o ponto S seja atingido. Podemos ver o comportamento de ambas as políticas nas figuras abaixo.

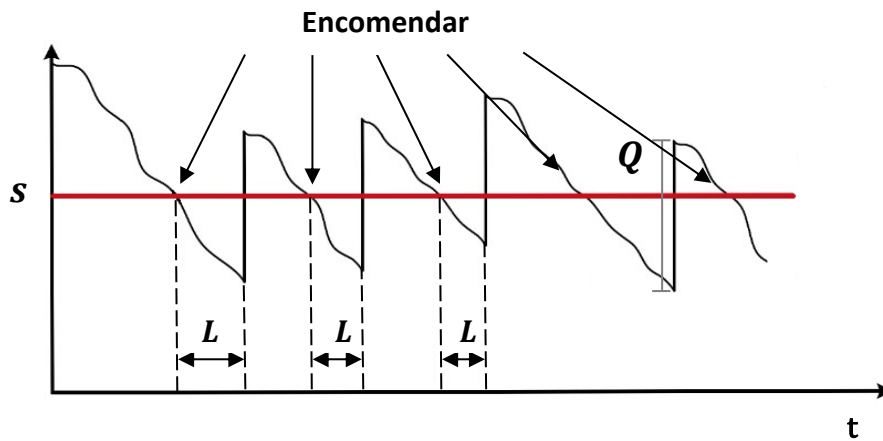


Gráfico 1: Política de Ponto de Encomenda

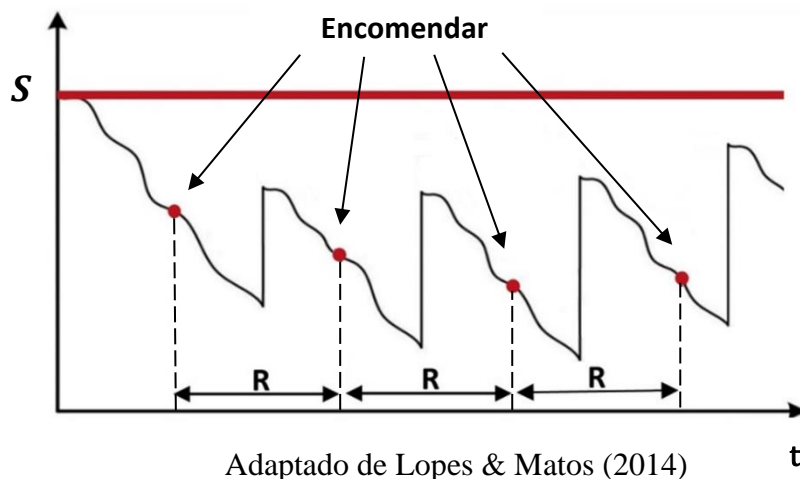


Gráfico 2: Política de Revisão Cíclica

No modelo proposto por Silver et al. (1998), a equação do custo médio total por unidade de tempo de ciclo para cada política, refere-se a um modelo de vendas diferidas e é constituída por 3 parcelas: o custo fixo de encomenda, o custo de imobilização (proporcional ao *stock* médio) e o custo de rotura.

Tem-se, para a política de Ponto de Encomenda:

$$K_t = \frac{AD}{Q} + \left(\frac{Q}{2} + s - \hat{x}_L \right) vr + B_2 v \frac{D}{Q} \sigma_L G_u(k) \quad (1)$$

e para a política de Revisão Cíclica:

$$K_t = \frac{M}{R} + \left(\frac{DR}{2} + S - \hat{x}_{L+R} \right) vr + B_2 v \frac{1}{R} \sigma_{L+R} G_u(k), \quad (2)$$

onde:

K_t – custo médio total por unidade de tempo de ciclo;

A – custo fixo de encomenda;

D – procura média por unidade de tempo;

Q – quantidade a encomendar;

s – ponto de encomenda;

\hat{x}_L – procura média durante o tempo de entrega (onde $\hat{x}_L = L * D$ e onde L – tempo de entrega médio);

v – custo unitário;

r – taxa de imobilização de *stock*;

$B_2 v$ – custo de rotura por unidade em falta;

σ – desvio-padrão do tempo de entrega;

σ_L – desvio-padrão da procura durante o tempo de entrega ($\sigma_L = L * \sigma_D^2 + \sigma^2 * D^2$);

σ_{L+R} – desvio-padrão da procura durante o tempo de entrega e revisão;

$G_u(k)$ – função de perdas da distribuição normal reduzida;

M – custo fixo de encomenda e revisão ($A + J$, onde J – custo de revisão);

R – período de revisão;

S – nível máximo a encomendar;

\hat{x}_{L+R} – procura média durante o tempo de entrega e revisão (onde $\hat{x}_{L+R} = (L + R) * D$);

k – fator de risco.

4.1. Dados do Problema

As variáveis base em causa dizem respeito a um item de tipo B, segundo a Análise de Pareto (também conhecida como Curva ABC), tal como podemos observar na figura abaixo.

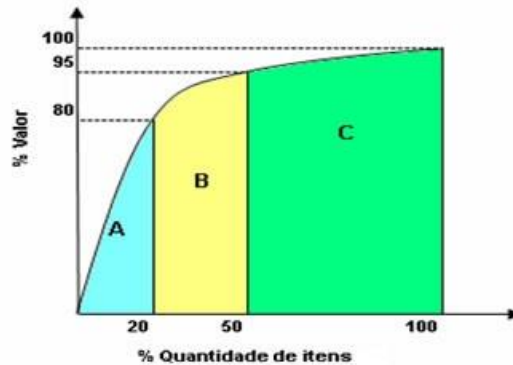


Figura 3: Análise de Pareto

Trata-se de um item que está englobado no grupo que representa cerca de 30% dos produtos de uma empresa e gera 15% dos seus ganhos (valor).

O produto apresenta uma procura que segue uma distribuição normal de média 220 unidades diárias e um desvio-padrão de 28 unidades.

Os custos que constituem o custo total dividem-se em três categorias distintas, tal como mencionado na secção anterior. Admite-se, então, um custo unitário de 100 unidades monetárias (u.m.). O custo fixo de encomenda na política de Ponto de Encomenda e o custo fixo de encomenda e revisão na política de Revisão Cíclica são respetivamente 3,00 u.m./encomenda e 3,10 u.m./(encomenda + revisão). A taxa de manutenção, de acordo com Muckstadt & Sapro (2010), deve, geralmente, estar compreendida entre os 15% e os 25% do custo unitário (v). Por conseguinte, para o presente estudo foi considerada uma taxa de manutenção anual média de 22,50%, que,

transformado em custo de manutenção diário, equivale a 0,062 u.m./unidade.dia. Por fim, o custo de rotura é de 0,29 u.m./unidade em falta.

Resumidamente, na Tabela 1, podem encontrar-se os parâmetros relativos ao item e na Tabela 2 os custos.

Procura Média Diária (unidade/dia)	220,00
Desvio-Padrão da Procura Diária (unidades)	28,00

Tabela 1: Parâmetros do item

Unitário (u.m./ unidade)	100,00
Fixo de Encomenda (u.m./encomenda)	3,00
Fixo de Encomenda + Revisão (u.m./encomenda+revisão)	3,10
Manutenção (u.m./unidade.dia)	0,062
Rotura (u.m./unidade em falta)	0,29

Tabela 2: Custos do item

O parâmetro a alternar ao longo da experimentação de simulação, e posteriormente otimização em simulação, é o valor médio do tempo de entrega, parâmetro esse que é relevante na origem das encomendas cruzadas. Optou-se por esta alternativa, porque os modelos analíticos e a sua otimização são válidos para condições médias, o que conduz a considerações mais claras da frequência de encomendas cruzadas, no caso particular da política de Revisão Cíclica.

Admitem-se cinco cenários principais. Estes apresentam médias 1/10, 5, 10, 20 e 30 vezes superiores ao seu desvio-padrão, dado que a base é 1 dia.

Tanto para a política de Ponto de Encomenda, como para a política de Revisão Cíclica, a determinação do tipo de produto é avaliada tendo em conta o valor da procura durante o tempo de entrega (\hat{x}_L) e σ_L (Tabela 3).

	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV	Cenário V
L	1,10	5,00	10,00	20,00	30,00
σ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
D	220,00	220,00	220,00	220,00	220,00
\hat{x}_L	242,00	1.100,00	2.200,00	4.400,00	6.600,00
σ_L	221,95	228,74	237,15	253,14	268,18

Tabela 3: Características paramétricas da procura durante o tempo de entrega

Como podemos verificar, em qualquer dos cenários admitidos, o valor de \hat{x}_L é sempre largamente superior a 10 unidades. Consequentemente, e segundo Silver et al. (1998), consideramos que se trata de um produto durável com elevada rotação (*fast moving item*).

4.2. Metodologia dos Modelos de Simulação

No presente trabalho, escolheu-se como *software* de simulação o *ExtendSim8*¹. Em cada experimentação de simulação, o programa vai correr 100 vezes (*runs*), cada uma com 10.000 dias associados (o que permite obter uma estabilidade de resultados adequada). No entanto, inicialmente, o programa é corrido para determinar o período de aquecimento (também conhecido como *warm-up period*). Este período não deve ter influência nos resultados, uma vez que só deve ser considerado o período de tempo em que a variação nos valores médios é reduzida. Tanto para a política de Ponto de

¹ <https://www.extendsim.com/flipbooks/ExtendSimUserGuide.pdf> (*ExtendSim9*[®] *User Guide*).

Encomenda como para a política de Revisão Cíclica, considera-se um *warm-up period* de 700 dias (valor estimado por inspeção visual do gráfico do valor médio dos custos do sistema), ou seja, os resultados só irão ser baseados nos últimos 9.300 dias, ignorando os 700 primeiros resultados obtidos.

Seguidamente, é testado o modelo alternando os parâmetros do tempo médio de entrega, tal como refletido nos cenários apresentados anteriormente. Será feita a recolha dos resultados, que serão posteriormente analisados. Esta experimentação é concretizada recorrendo, numa primeira fase, às variáveis determinadas através dos modelos analíticos, e recorrendo ao *software* em modo de simulação e por último, em modo de otimização em simulação com recorrência ao bloco *Optimizer* (explicado na secção 5.3. infra).

5. SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

5.1. Modelos de Simulação

Em primeiro lugar, é feita a descrição das políticas de gestão de *stocks* em estudo neste trabalho e que foram espelhadas nos blocos do *software*. Os modelos de simulação representam, através de blocos, o procedimento real da aplicação dessas mesmas políticas (PE e RC). As características mais pormenorizadas de cada bloco podem ser encontradas no *ExtendSim9 User Guide* e nos anexos deste trabalho.

Os modelos recorrem maioritariamente a blocos da biblioteca *Value*, sendo o bloco *Plotter* o único da biblioteca *Plotter*.

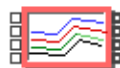


Figura 4: Bloco *Plotter*

Os primeiros três blocos presentes à esquerda na Figura 5 infra (*Constant*) são utilizados para atribuir constantes e servir de *input* a cada um dos custos que representam: custo fixo de encomenda, custo de imobilização e custo de rotura por unidade em falta.

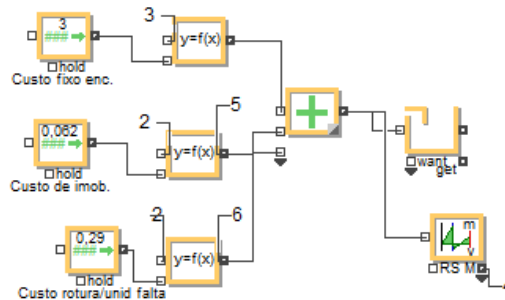


Figura 5: Blocos *Constant*

Estes estão diretamente ligados ao *Equation*, que gera os *outputs* das equações que se inserem no *dialog* deste bloco. Neste caso, os *inputs* são originários de duas situações, dos valores introduzidos no bloco *Constant* e também de outros dois blocos, do *Holding Tank* (*stock* em mão, à esquerda na Figura 5 infra, output 2) e do bloco *Decision* (ao centro na Figura 6, output 3).

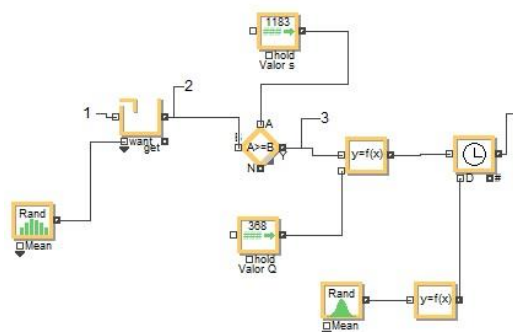


Figura 6: Bloco *Decision*

Tal como o nome indica, o bloco *Decision* diz respeito a uma decisão: se no decorrer de uma *run* o valor for inferior ou igual a s , então o bloco devolve o valor 1 (encomendar Q unidades), e no caso contrário devolve 0, ou seja, não é necessário encomendar. O bloco *Math* é usado para proceder à soma de todas as parcelas a ele ligadas, ou seja, de todos os custos que constituem o custo total. Este último está conectado a dois outros: um primeiro, *Holding Tank*, que acumula um histórico de todos os custos alcançados até ao momento, e um segundo, *Mean&Variance*, que calcula a média, variância e desvio-padrão dos resultados alcançados ao longo da simulação.

Por fim, o bloco *Plotter I/O* gera o gráfico dos resultados obtidos no bloco *Mean&Variance*.

O bloco *Random Number* gera números aleatórios baseados na distribuição estatística pretendida. Este está ligado a outro *Holding Tank*, que por sua vez armazena o *stock* em mão, ao qual é retirado o valor da procura proveniente do bloco *Random Number*. Segue-se o bloco *Wait Time*, onde é atrasado o processamento do recebimento da encomenda de acordo com a distribuição estabelecida para o tempo de entrega, neste caso, a distribuição Normal (cenários apresentados precedentemente).

O bloco *Optimizer* procura o melhor *set* de variáveis para o modelo em questão, através da minimização de custos (este bloco é explicado mais detalhadamente na secção 5.3.). Por fim, o bloco *Stats* é utilizado para recolher todos os resultados pretendidos e exportá-los para uma tabela única num ficheiro de *Excel*.

Quanto à política da Revisão Cíclica, os blocos constituintes desta política são iguais e com a mesma funcionalidade dos da política de Ponto de Encomenda. Contudo, à primeira política acresce o bloco *Pulse*. Este tem a função de retornar o valor 1 de R em R períodos (período de revisão) e 0 nos restantes períodos.

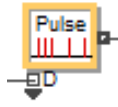


Figura 7: Bloco *Pulse*

5.2. Otimização

De acordo com Lopes & Matos (2014), para além de recorrer a modelos clássicos e analíticos, de que são exemplos as equações 1 e 2 anteriormente mencionadas, é benéfico recorrer também a alternativas como a simulação e a otimização em simulação. Estas últimas são mais eficientes e de maior confiança, quando comparadas com as técnicas puramente analíticas.

5.3. Otimização em Simulação

A otimização em simulação é um processo automático de determinação de variáveis ótimas (ou ideais) que irão minimizar ou maximizar a função objetivo de um qualquer modelo. Este processo de otimização em simulação é feito com recorrência a um bloco que integra o *ExtendSim8*®, o bloco *Optimizer*. Merece referência a excelente explicação deste bloco e do seu algoritmo apresentados no estudo feito por Zvirgzdiņa & Tolujevs (2013). O algoritmo desenvolvido neste bloco recorre a algoritmos evolutivos, nomeadamente, a algoritmos genéticos.

O algoritmo subjacente ao bloco começa por atribuir ao modelo um *set* de possíveis soluções iniciais, dispensando a metade que apresenta resultados piores. Cada uma das soluções alcançadas – a que se dá o nome de indivíduo – é, posteriormente, explorada várias vezes em busca de novas soluções que sejam consideradas como melhores (no nosso caso, que apresentem um custo médio total do sistema mais reduzido). Esta

avaliação é feita com base na função de ajuste (*fitness function*) subjacente ao bloco, testando a qualidade (para posterior seleção) de cada um desses indivíduos, podendo estes passar por processos de “acasalamento” (*mating*) e mutação (*mutation*). A cada novo conjunto de indivíduos encontrados dá-se o nome de população (Hillier & Lieberman, 2015).

O processo continua até que não se consigam encontrar soluções melhores que as que até então foram registadas. O *Optimizer* tem duas opções para o critério de paragem: um primeiro que se relaciona com um número máximo (pré-definido) de *runs* que o modelo fará, e um segundo que está por sua vez ligado a um valor limitativo geral do indicador de convergência. Este parâmetro mede a variação relativa entre o máximo e o mínimo do custo total médio de cada sistema a ser simulado de entre a população das 10 melhores soluções eleitas. O critério de paragem escolhido foi o segundo, cujas *runs* param quando se tiver atingido uma percentagem igual ou superior a 99,50% (ou o mais próximo possível desse valor). Por último, importa referir que, em apenas um dos cenários testados, foi forçada a paragem por não convergir para a percentagem definida em tempo “útil”, chegando o mesmo a correr mais do que 83 horas.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

6.1. Análise de Resultados

Todo o trabalho prático foi feito admitindo algumas hipóteses simplificadoras, tanto nos modelos analíticos como naqueles em que existe recorrência à simulação ou à otimização em simulação. Silver et al. (1998), Muckstadt et al. (2010) e Arends (2016) consideram as seguintes simplificações para o primeiro caso (modelos analíticos):

- Existência de uma *backorder* por ciclo;

- A quantidade média em *backorder* pode não ser considerada no custo de imobilização por ciclo;
- Verifica-se sempre procura no ciclo;
- Não existe possibilidade de cruzamento de encomendas, uma vez que, se duas ou mais encomendas para o mesmo item são feitas em períodos temporais diversos, as mesmas serão recebidas exatamente na mesma ordem em que foram concretizadas, sendo esta relevante nos princípios básicos de conceção dos modelos.

Contrariamente, quando recorremos à simulação e à otimização em simulação, o funcionamento é o efetivo do sistema, ou seja, é aquele que mais próximo da realidade está.

Adicionalmente, importa salientar que os custos médios por unidade de tempo de funcionamento do sistema (TRC) e aqueles calculados analiticamente (K_t), não poderão ser utilizados como base idêntica de comparação, tendo em atenção que o ciclo é uma abstração teórica admitida para se utilizar a otimização analítica na obtenção de variáveis de gestão ajustadas, enquanto que o custo médio do funcionamento do sistema por unidade de tempo é uma grandeza com base diversa da anterior, representando assim o custo efetivo do sistema.

Passando agora à análise de resultados, e tal como referido na secção 4.2., recorreu-se, em primeiro lugar, apenas a aproximações menos elaboradas, calculando-se as variáveis fundamentais de cada política (PE: (Q, s) ; RC: (R, S)).

De acordo com Silver et al. (1998), o cálculo das variáveis para as políticas em estudo é obtido através das equações infra:

$$Q = \sqrt{\frac{2AD}{vr}} \quad (3)$$

$$s = k\sigma_L + \hat{x}_L \quad (4)$$

$$R = \frac{\sqrt{\frac{2MD}{vr}}}{D} \quad (5)$$

$$S = k\sigma_{L+R} + \hat{x}_{L+R}, \quad (6)$$

onde Q é a quantidade a encomendar, s é o ponto de encomenda, R é o período de revisão e S é o nível a que se eleva o *stock*.

Adicionalmente, para o cálculo da probabilidade de rotura durante o tempo de entrega ($P_{u \geq}(k)$), obtêm-se as equações (7) e (8), através de derivadas parciais em ordem a s e S respetivamente, para cada política em estudo. Tem-se então a equação (7) para a política de Ponto de Encomenda e a equação (8) para a política de Revisão Cíclica:

$$P_{u \geq}(k) = \frac{Qr}{B_2 D} \quad (7)$$

$$P_{u \geq}(k) = \frac{rR}{B_2} \quad (8)$$

Recorrendo às equações (3) a (8), determinaram-se as seguintes variáveis para cada um dos cenários experimentados:

	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV	Cenário V
Q	146,00	146,00	146,00	146,00	146,00
$P_{u \geq}(k)$	0,1419	0,1419	0,1419	0,1419	0,1419
k	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
s	479,00	1345,00	2454,00	4671,00	6887,00

Tabela 4: Variáveis da política de PE (Aproximação Analítica)

	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV	Cenário V
R	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$P_{u \geq}(k)$	0,2138	0,2138	0,2138	0,2138	0,2138
k	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
S	699,00	1564,00	2673,00	4890,00	7106,00

Tabela 5: Variáveis da política de RC (Aproximação Analítica)

Tendo em conta os resultados obtidos nas Tabelas 4 e 5, é relevante verificar que é feita mais do que uma encomenda por dia de ciclo, visto que a sua dimensão é igual a 0,66 dias, o que significa que existem quase dois ciclos num dia, e como refere Arends (2016), ao assumir que é nula a probabilidade de a procura ser 0, então significa que se pode despoletar em média duas encomendas num dia, aumentando assim a probabilidade do cruzamento de encomendas para esta aproximação.

Na Revisão Cíclica o ciclo é de 1,00 dia. Ora, encomendar apenas uma vez ao dia, diminui a probabilidade de encomendas cruzadas.

Posteriormente, foram determinadas novas variáveis através de otimização dos modelos analíticos. Estas variáveis foram alcançadas através de dois algoritmos² (Anexos 3 e 4), cujo critério de paragem é alcançado quando em duas iterações consecutivas se obtiverem os mesmos valores. Temos então:

² Algoritmos adaptados de Silver et. al (1998).

	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV	Cenário V
<i>Q</i>	352,00	366,00	379,00	410,00	439,00
<i>s</i>	332,00	1185,00	2280,00	4465,00	6650,00

Tabela 6: Variáveis da política de PE (Otimização Analítica)

	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV	Cenário V
<i>R</i>	1,60	1,66	1,72	1,82	2,00
<i>S</i>	685,00	1551,00	2659,00	4872,00	7089,00

Tabela 7: Variáveis da política de RC (Otimização Analítica)

Utilizando as variáveis obtidas através da aproximação analítica e inserindo-os no *software* em modo de simulação, obtiveram-se os seguintes resultados para a aproximação analítica:

	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV	Cenário V
<i>Q</i>	146,00	146,00	146,00	146,00	146,00
<i>s</i>	479,00	1345,00	2454,00	4671,00	6887,00
<i>TRC</i> ³	107399,27	107610,03	107670,09	108205,64	108584,99

Tabela 8: Variáveis e custo total da política de PE (Aproximação Analítica)

	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV	Cenário V
<i>R</i>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<i>S</i>	699,00	1564,00	2673,00	4890,00	7106,00
<i>TRC</i>	48,16	232,25	662,76	2190,00	4428,59

Tabela 9: Variáveis e custo total da política de RC (Aproximação Analítica)

³ É de observar o quão grosseiros os modelos analíticos podem ser, obtendo-se assim variáveis largamente desfasadas dos valores ótimos e que não deverão ser consideradas aquando da determinação desses mesmos valores.

E para as variáveis obtidas através de otimização analítica:

	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV	Cenário V
<i>Q</i>	352,00	366,00	379,00	410,00	439,00
<i>s</i>	332,00	1185,00	2280,00	4465,00	6650,00
<i>TRC</i>	32,94	69,44	127,76	263,09	418,43

Tabela 10: Variáveis e custo total da política de PE (Otimização Analítica)

	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV	Cenário V
<i>R</i>	1,60	1,66	1,72	1,82	2,00
<i>S</i>	685,00	1551,00	2659,00	4872,00	7089,00
<i>TRC</i>	23,61	118,40	352,71	1166,32	2411,44

Tabela 11: Variáveis e custo total da política de RC (Otimização Analítica)

Finalmente, em modo de otimização em simulação, obtiveram-se os resultados que se seguem:

	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV	Cenário V
<i>Q</i>	261,00	234,00	249,00	239,00	269,00
<i>s</i>	395,00	1067,00	2003,00	3820,00	5379,00
<i>TRC</i>	23,82	45,90	80,31	147,94	230,99
Conv.	95,17%	97,69%	99,54%	99,60%	99,56%

Tabela 12: Variáveis e custo total da política de PE (Otimização em Simulação)

	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV	Cenário V
<i>R</i>	2,00	5,00	13,00	23,00	15,00
<i>S</i>	578,00	1254,00	4976,00	8981,00	3516,00
<i>TRC</i>	21,53	31,78	74,78	130,59	101,53
Conv.	99,93%	99,64%	99,55%	99,81%	99,66%

Tabela 13: Variáveis e custo total da política de RC (Otimização em Simulação)

Ao serem observados os resultados dos custos médios para os vários cenários, para as diferentes políticas e abordagens diversas, torna-se evidente o cuidado que deverá presidir à determinação de variáveis que sustentam as várias políticas utilizadas. A aproximação mais grosseira conduz a custos por unidade de tempo extremamente elevados, quando se utiliza a simulação. O emprego de modelos analíticos mais elaborados conduz a resultados com maior consistência. No entanto, devido às simplificações empregues, conduzem a uma estimação paramétrica afastada do ótimo efetivo. Embora se devam questionar todas elas, a não existência de cruzamento de encomendas reveste-se de importância significativa, uma vez que conduz a uma redução que pode ser significativa do desvio-padrão do tempo de entrega (σ), mantendo o mesmo valor de L , como demonstram Zalkind (1978), Hayya et al. (2008), Hayya et al. (2009), Hayya et al. (2010), Hayya et al. (2011) e Bischak et al. (2013). Estas aproximações conduzem a valores muito diversos de TRC quando as variáveis são calculadas analiticamente ou determinados através de simulação. Note-se, por exemplo, o impacto que as variações de σ implicam em σ_L na política do Ponto de Encomenda e no cenário IV.

L	σ	σ_L
20,00	1,00	253,14
20,00	0,75	207,13
20,00	0,50	166,67

Tabela 14: Impacto de variações de σ no valor de σ_L

A importância de σ_L (não corrigido) é considerado como variável *proxy* de σ_L efetivo na determinação do TRC é presente nos Gráficos 3 e 4 (Cenário I), no que se refere às variáveis obtidos por otimização em simulação para as duas políticas.

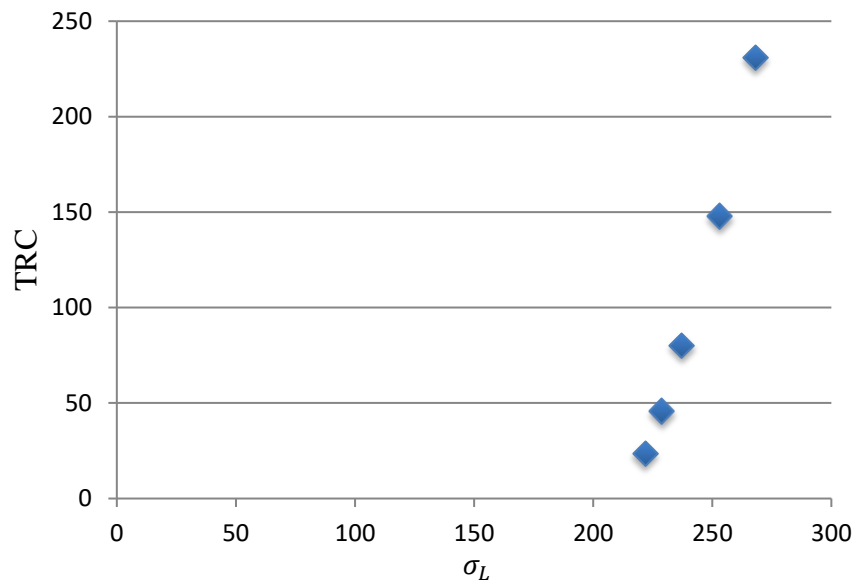


Gráfico 3: Relação entre σ_L e TRC

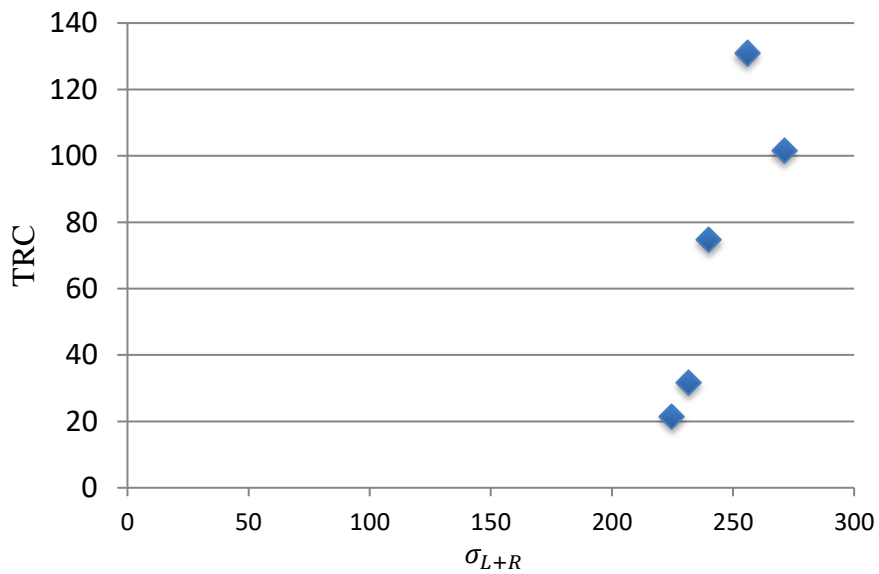


Gráfico 4: Relação entre σ_{L+R} e TRC

Andamento idêntico se verifica para os valores numéricos calculados através da otimização analítica para $K_t(\sigma_L)$.

Naturalmente, para valores mais baixos de σ_L , a correção deste através do valor de σ efetivo conduzirá a uma menor variação de TRC , para além do baixo valor do tempo de entrega poder reduzir potencialmente o número de *backorders* a serem verificados por ciclo (note-se que o intervalo de tempo médio é aproximadamente igual ou superior a L), o que justifica a aproximação de resultados das várias abordagens, conforme se apresenta de seguida (cenário I):

Aproximação Analítica						Otimização Analítica					
PE			RC			PE			RC		
Q	s	K_t	R	S	K_t	Q	s	K_t	R	S	K_t
146,00	479,00	30,80	1,00	699,00	29,43	352,00	332,00	27,54	1,60	685,00	35,97

Simulação da Otimização Analítica						Otimização em Simulação					
PE			RC			PE			RC		
Q	s	TRC	R	S	TRC	Q	s	TRC	R	S	TRC
352,00	332,00	32,94	1,60	685,00	23,61	261,00	395,00	23,82	2,00	578,00	21,53

Tabela 15: Proximidade das variáveis das políticas para o Cenário I

A aproximação observada entre os valores das variáveis de K_t e de TRC , denota a boa qualidade do modelo de simulação construído e implementado neste trabalho.

Para a otimização em simulação verifica-se que os resultados apresentados do TRC , quando comparados com aqueles obtidos por estimação paramétrica analítica, são significativamente mais baixos, o que releva o impacto das simplificações introduzidas nestes últimos.

Poder-se-á pôr em causa se o tempo e a complexidade de cálculo justificam tal tipo de procedimentos. Os resultados obtidos confirmam só por si o procedimento. Aliás, esta situação encontra ainda suporte em Bradley & Robinson (2005) ao afirmarem “(...) effects of crossovers can be large if its probability is small, the effects are still moderated if the probability hereof is relatively small”, o que conduz e elege a utilização de otimização em simulação como uma alternativa a ser considerada.

Comparando os resultados obtidos através da otimização por simulação, com os da otimização analítica, relativamente à estimativa paramétrica para a política do Ponto de Encomenda, é de salientar a maior probabilidade de se verificar cruzamento de encomendas no primeiro caso, uma vez que, na generalidade, os valores de Q e s são menos elevados, conforme se apresenta nos Gráficos 5 e 6.

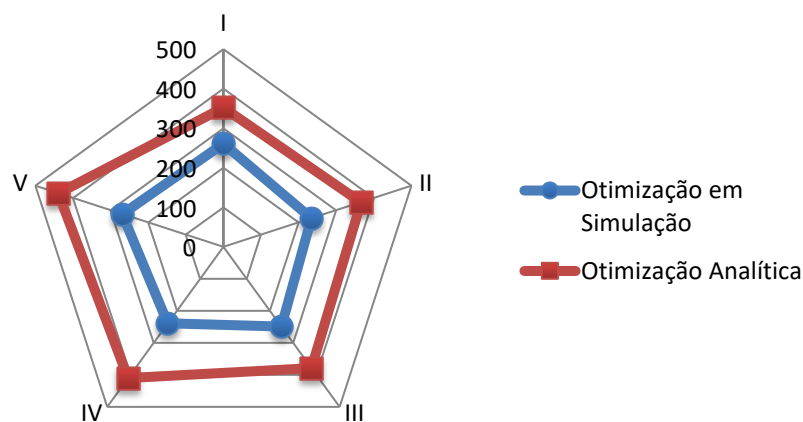


Gráfico 5: Valores de Q nos Cenários I a V da Política de Ponto de Encomenda

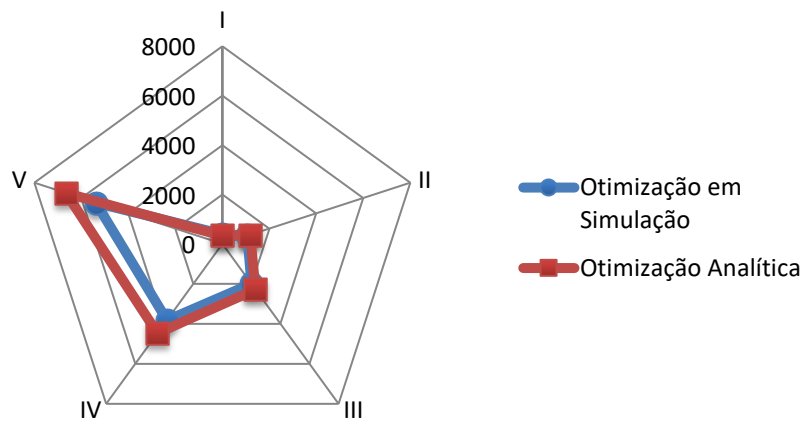


Gráfico 6: Valores de s nos Cenários I a V da Política de Ponto de Encomenda

Este facto é potenciado pela maior periodicidade da encomenda. Se a frequência de encomenda for menor, implica períodos entre encomendas maiores, traduzindo-se, assim, numa probabilidade de cruzamento menor, conforme é referido por Song & Zipkin (1996) e mais tarde por Hayya et al. (2011). Nesta circunstância, é possível concluir que as políticas do Ponto de Encomenda, tendo como base a estimação através da otimização em simulação, aproveitam de forma acentuada o cruzamento de encomendas.

Ao serem analisados os resultados obtidos para a Revisão Cíclica, verifica-se, no entanto, que o aproveitamento do cruzamento de encomendas poderá ser mais moderado, uma vez que os períodos de revisão são praticamente semelhantes ao tempo médio de entrega.

Apenas no cenário V, se verifica que este valor se afasta de forma significativa, ($L = 30, R = 15$), potenciando a existência de encomendas cruzadas, o que poderá justificar o resultado encontrado.

Ao serem comparados os valores de TRC para as duas políticas, utilizando a otimização em simulação, verifica-se que os resultados para a Revisão Cíclica mostram

valores de custos médios inferiores àqueles observados no Ponto de Encomenda. Este facto pode ser sustentado pela natureza da própria política, que conduz a que apenas se façam encomendas de R em R unidades de tempo e variáveis, de acordo com o *stock* em mão existente na altura da revisão. Note-se que no Ponto de Encomenda, a quantidade a solicitar é constante, o que torna a política mais rígida (Batista & Lopes, 2015) não permitindo eventualmente melhores resultados.

6.2. Conclusões

O presente trabalho tem como objetivo apresentar, numa primeira aproximação de natureza empírica, o impacto das encomendas cruzadas nas variáveis e no custo médio total das políticas em estudo.

São consideradas como mais significativas as seguintes conclusões:

- Torna-se relevante o cuidado que deve presidir à determinação das variáveis que caracterizam as duas políticas estudadas. A aproximação menos refinada conduz a custos por unidade de tempo do sistema muito superiores àqueles obtidos nas duas outras abordagens;

- A otimização analítica, embora com resultados mais consistentes nos custos do sistema apresenta, na generalidade, valores superiores àqueles que são calculados através da otimização em simulação. Este facto deve-se às aproximações que são introduzidas nos modelos analíticos, nomeadamente no que respeita ao cruzamento de encomendas;

- A consideração de cruzamento de encomendas conduz a valores mais reduzidos de σ , o que tem uma influência de grande impacto no cálculo de σ_L efetivo, com implicação significativa nos custos do sistema;

- A política do Ponto de Encomenda apresenta uma maior apetência para se verificar cruzamento de encomendas, no caso da otimização por simulação, por apresentar uma maior frequência de encomenda;

- No caso da Revisão Cíclica, o aproveitamento do cruzamento de encomendas é mais moderado, já que os períodos de revisão são, geralmente, semelhantes ao tempo médio de entrega de encomenda;

- A política de Revisão Cíclica mostra custos médios por unidade de tempo de funcionamento do sistema inferiores àqueles observados para o Ponto de Encomenda, podendo este facto encontrar explicação na natureza operativa da própria política;

- A utilização da otimização em simulação poderá ser empregue como processo que permite ultrapassar as limitações apresentadas pelos modelos numéricos. A maior complexidade computacional desta abordagem é amplamente justificada em face dos resultados conseguidos.

7. FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Tal como mencionado na introdução do presente trabalho, este é apenas uma primeira abordagem de natureza empírica ao problema em questão, devendo-se, como tal, realizar testes e análises mais aprofundados e que permitam conduzir a modelos mais ajustados a situações reais. Esta situação vai de encontro ao que foi referido na secção 6.1. “Poder-se-á pôr em causa se o tempo e a complexidade de cálculo justificam tal tipo de procedimentos. Os resultados obtidos confirmam, só por si, o procedimento.”. A simulação representa, neste momento, a técnica mais fidedigna, apresentando resultados mais aproximados dos valores efetivos (reais), aquando da experimentação e tentativa de resolução das questões levantadas ao longo deste estudo.

Justifica-se, assim, estudar de forma mais aprofundada, mecanismos que permitam identificar a incidência de encomendas cruzadas e as correções a serem efetuadas de maneira expedita no desvio-padrão do tempo de entrega, de forma a operacionalizar de maneira adequada os modelos analíticos.

Uma via a explorar, por exemplo, seria utilizar a simulação de forma a gerar a procura durante o tempo de entrega de encomenda (admitindo assim cruzamento de encomendas), calculando-se a média e variância dessa variável. Estes estimadores permitiriam vir a utilizar valores de σ_L e \hat{x}_L mais ajustados no cálculo das variáveis de gestão, quando se empregassem os modelos numéricos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arends, S. J. G., TU, Z. Z. A., & Adan, O. P. D. I. I. I. (2016). *Order Crossovers in Inventory Management. Qualitative and Quantitative Insights*.
- Bagchi, U., Hayya, J. C. & Chu, C. H. (1986). *The effect of lead time variability: The case of independent demand*. *Journal of Operations Management*, 6 (2), pp. 159–177.
- Bischak, D., Robb, D., Silver, E., & Blackburn, J. (2013). *Analysis and Management of Periodic Review, Order-Up-To Level Inventory Systems with Order Crossover*. *Production & Operations Management*, 23, 5, pp. 762–772.
- Bradley, J. R., & Robinson, L. W. (2005). *Improved base-stock approximations for independent stochastic lead times with order crossover*. *Manufacturing & Service Operations Management*, 7 (4), pp. 319-329.
- Caplice, C. & Kalkanci, B. (2012). *Ocean transportation reliability: myth vs. reality*. In presentation to annual meeting of council of supply chain management professional. Atlanta, GA.
- Chopra, Sunil & Peter Meindl (2016). *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation*. 6th Edition. Pearson Education.
- Disney, S. M. et al. (2016). *Inventory management for stochastic lead times with order crossovers*. *European Journal of Operational Research*, 2, pp. 473–486.
- Eppen, G. D. & Martin, R. K. (1988). *Determining safety stock in the presence of stochastic lead time and demand*. *Management Science*, 34, pp. 1380–1390.
- ExtendSim User Guide*. (2007). Imagine That.
- Fransoo, J. C. & Lee, C.-Y. (2012). *The critical role of ocean container transport in global supply chain performance*. *Production and Operations Management*, 22 (2), pp. 253–268.

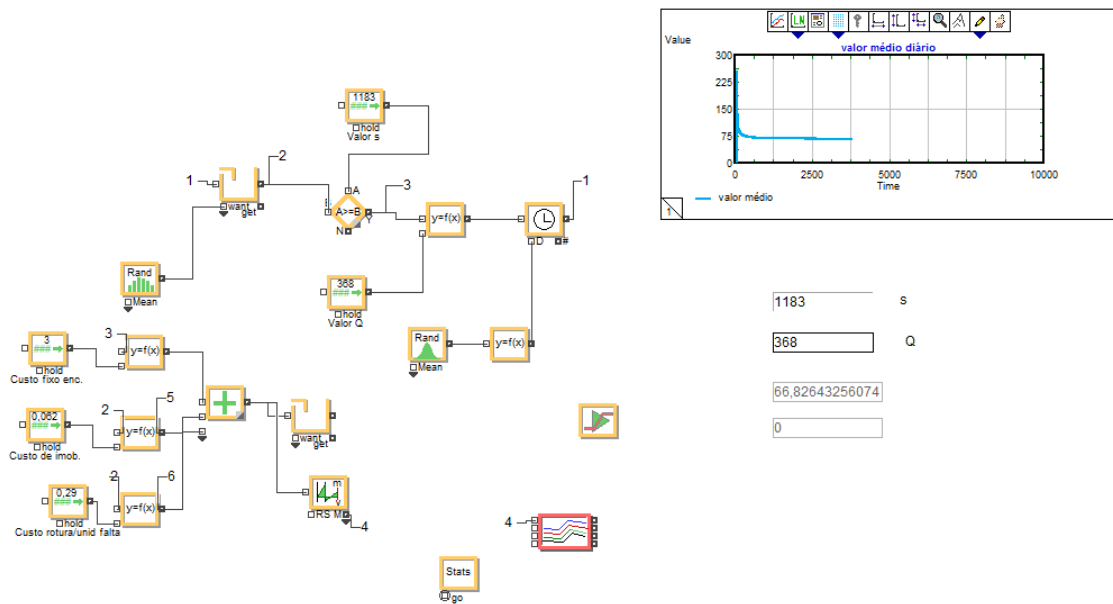
- Hadley, G. & Whitin, T. (1963). *Analysis of inventory systems*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Hayya, J. & Harrison, T. (2010). *A mirror-image lead time inventory model*. International Journal Of Production Research, 48, 15, pp. 4483–4499.
- Hayya, J., Bagchi, U., Kim, J. & Sun, D. (2008). *On static stochastic order crossover*. International Journal of Production Economics, 1, pp. 404–413.
- Hayya, J., Harrison, T. & Chatfield, D. (2009). *A solution for the intractable inventory model when both demand and lead time are stochastic*. International Journal Of Production Economics, 122, 2, pp. 595-605.
- Hayya, J., Harrison, T., & He, X. (2011). *The impact of stochastic lead time reduction on inventory cost under order crossover*. European Journal Of Operational Research, 2, pp. 274–281.
- He, X., Kim, J.G. & Hayya, J.C. (2005). *The cost of finite lead-time variability in inventory analysis*. International Journal of Production Economics, 97, 130–142.
- He, X., Xu, S., Ord, K. & Hayya, J. (1998). *An inventory model with order crossover*. Operations Research, 46 (3), pp. S112–S119.
- He, X.X. (1992). *Stochastic inventory systems with order crossover*. Ph.D. Dissertation, Department of Management Science, Pennsylvania State University.
- Hillier, F. S. & Lieberman, G. J. (2015). *Introduction to Operations Research*. 10th Edition. McGraw-Hill India.
- Jula, P. & Leachman, R. C. (2011). *Long and short run supply chain optimization models for the allocation and congestion management of containerized imports from Asia to the United States*. Transportation Research, Part E, 47 (5), pp. 593–608.

- Kalkanci, B. & Caplice, C. (2012). *Empirical investigation of global transit reliability*. Technical report. MIT Cambridge, MA.
- Kaplan, R.S. (1970). *A dynamic inventory model with stochastic lead times*. Management Science, 16 (7), pp. 491–507.
- Law, A. M. (2003). *How to Conduct a Successful Simulation Study*. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. pp. 66–70.
- Law, A. M. (2014). *Simulation Modeling and Analysis*. 5th Edition. McGraw-Hill Education.
- Leachman, R. C. & Jula, P. (2012). *Estimating flow times for containerized imports to the United States through the Western Rail Network*. Transportation Research, Part E, 48 (1), pp. 296–309.
- Liberatore, M. J. (1979). *The EOQ model under stochastic lead time*. Operations Research, 27, pp. 391–396.
- Lopes, José Á. C. A. & Batista, A. F. M. (2015). *Metodologia Integrada para Avaliação de Políticas de Gestão de Stocks em Cadeias de Abastecimento Utilizando Simulação*, Economia&Empresa, 19, pp. 133–158.
- Lopes, José Á. C. A. & Matos, José M. L. (2014). *Heurísticas em Gestão de Stocks: Evidências Empíricas de Operação*. Economia & Empresa, 18, pp. 137–161. Management Science, 24, pp. 1384-1392.
- Muckstadt, J. A. e Saprà, A. (2010). *Principles of Inventory Management: When You Are Down to Four, Order More*. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering.
- Nasri, F. (1986). *Stochastic inventory control and the assumption of noninterchangeability*. Ph.D. Dissertation, City University of New York.

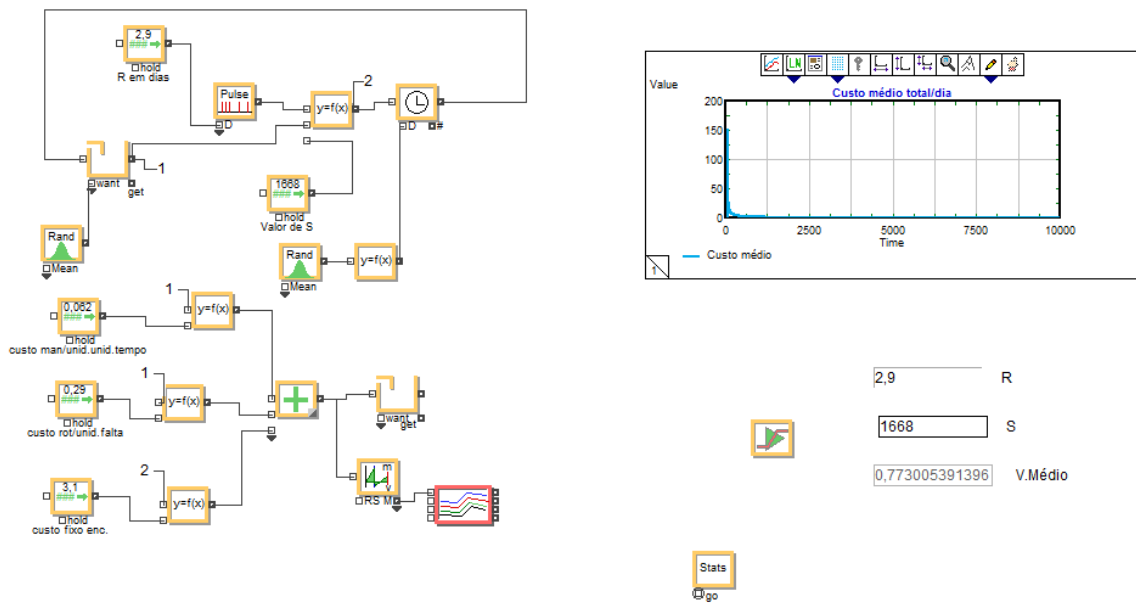
- Ramasesh, R. V., Ord, J. K., Hayya, J. C., & Pan, A. (1991). *Sole versus dual sourcing in stochastic lead-time (s, Q) inventory models*. *Management Science*, 37, pp. 428–443.
- Riezebos, J. & Gaalman, G. (2006). *A single-item inventory model for expected inventory order crossovers*. *International Journal Of Production Economics*, 121, pp. 601–609.
- Riezebos, J. (2006). *Inventory order crossovers*. *International Journal of Production Economics*, 2, pp. 666–675.
- Saldanha, J. P., Tyworth, J. E., Swan, P. F. & Russell, D. M. (2009). *Cutting logistics costs with ocean carrier selection*. *Journal of Business Logistics*, 30 (2), pp. 175–191.
- Silver, E. A., Pyke, D. F., Peterson, R. (1998). *Inventory management and production planning and scheduling*. 3rd Edition. John Wiley & Sons.
- Song, J. & Zipkin, P. (1996). *Inventory Control with Information about Supply Conditions*. *Management Science*, 10, pp. 1409–1419.
- Song, J.-S. (1994). *The effect of leadtime uncertainty in a simple stochastic inventory model*. *Management Science*, 40, pp. 603–613.
- Sphicas, G. & Nasri, F. (1984). *An inventory model with finite-range stochastic lead times*. *Naval Research Logistics Quarterly*, 31(4), pp. 609–616.
- Sphicas, G. (1982). *On the solution of an inventory model with variable lead times*. *Operations Research*, 30 (2), pp. 404–410.
- Srinivasan, M., Novack, R. & Thomas, D. (2011). *Optimal and Approximate Policies for Inventory Systems With Order Crossover*. *Journal of Business Logistics*, 32, 2, pp. 180-193.

- Stevenson, William J. (2017). *Operations Management*. 13th Edition. McGraw-Hill.
- Tempelmeier, H. (2011). *Inventory management in supply networks*. 2nd Edition.
- Tijms, H. C. & Groenevelt, H. (1984). *Simple approximations for the reorder point in periodic and continuous review (s,S) inventory systems with service level constraints*. European Journal of Operational Research, 17, pp. 175–190.
- Warburton, R. D. H. & Stratton R. (2002). *Questioning the relentless shift to offshore manufacturing*. Supply Chain Management: An International Journal, Vol. 7 Issue: 2, pp.101–108.
- Washburn, A. (1973). *A bi-modal inventory study with random lead times*. Technical Report AD769404. Monterey, California: Naval Postgraduate School.
- Wensing, T. & Kuhn, H. (2015). *Analysis of production and inventory systems when orders may cross over*. Annals Of Operations Research, 231, 1, pp. 265–281.
- Zalkind, D. (1978). *Order-level inventory systems with independent stochastic leadtimes*.
- Zheng, Y.S. (1992). *On properties of stochastic inventory systems*. Management Science, 28 (1), pp. 87–103.
- Zipkin, P. (1986). *Stochastic leadtimes in continuous-time inventory models*. Naval Research Logistics Quarterly, 33, pp. 763–774.
- Zipkin, P. H. (2000). *Foundations of inventory management*. Boston: McGraw-Hill.
- Zvirgzdiņa, B. e Totujevs, J. (2013). *Evolutionary Optimization of a Flow Line used ExtendSim Built-In Optimizer*. Proceedings of 13th International Conference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication”. Riga, Latvia. p. 155-162.

9. ANEXOS



Anexo 1: Estrutura da política de Ponto de Encomenda



Anexo 2: Estrutura da política de Revisão Cíclica



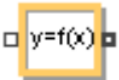

1. Inicializa-se o processo com um valor de $Q = \sqrt{\frac{2AD}{vr}}$
2. Recorre-se a $\int_s^\infty f(x)dx = \frac{Qr}{B_2D}$ para determinar o valor de s correspondente a Q








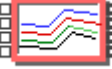
3. Recorre-se a $Q = \sqrt{\frac{2D[A+B_2v\sigma_L G_u(k)]}{vr}}$ com o valor de s determinado no passo anterior para calcular uma versão revista de Q
4. Voltar a 2. até o sistema convergir (duas iterações consecutivas com os os mesmos valores)

Anexo 3: Algoritmo para os Modelos de Otimização Analítica (PE)

1. Atribuir diversos valores para R e calcular S em função desse R
2. Substituir ambas as variáveis na equação do custo médio total por unidade de tempo de ciclo (K_t) e seleccionar o custo mais reduzido como ótimo

Anexo 4: Algoritmo para os Modelos de Otimização Analítica (RC)

<p><i>Constant</i></p> 	<p>Gera um valor constante que serve de <i>input</i> a outros blocos, que é especificado no <i>dialog</i>.</p>
<p><i>Decision</i></p> 	<p>Traduz-se numa decisão, onde os <i>outputs</i> são <i>True</i> ou <i>False</i> baseados nos <i>inputs</i> introduzidos e na lógica definida.</p>
<p><i>Equation</i></p> 	<p>Gera o <i>output</i> da equação inserida no <i>dialog</i>.</p>
<p><i>Holding Tank</i></p> 	<p>Acumula o total dos valores dos <i>inputs</i> e permite que um montante seja removido se estiver disponível.</p>

<p><i>Math</i></p> 	<p>Realiza a operação matemática inserida no <i>dialog</i>, gerando um resultado como <i>output</i>.</p>
<p><i>Mean&Variance</i></p> 	<p>Calcula a média, variância e desvio-padrão do <i>input</i> introduzido durante a simulação.</p>
<p><i>Optimizer</i></p> 	<p>Procura os melhores valores para as variáveis de um modelo, maximizando o proveito ou minimizando o custo, tendo em conta os limites dessas variáveis ou quaisquer restrições estabelecidas.</p>
<p><i>Pulse</i></p> 	<p>Devolve um valor como <i>True</i> em alturas específicas e um valor como <i>False</i> nos restantes momentos.</p>
<p><i>Random Number</i></p> 	<p>Gera números (pseudo) aleatórios, inteiros ou reais, baseados na distribuição pretendida.</p>
<p><i>Statistics</i></p> 	<p>Recolhe as estatísticas comuns dos blocos num modelo e transfere-as para uma única tabela.</p>
<p><i>Wait Time</i></p> 	<p>Armazena o histórico de <i>inputs</i> durante uma quantidade específica de tempo de simulação antes de a processar como <i>output</i>.</p>
<p><i>Plotter</i></p> 	<p>Gera um gráfico dos valores de um qualquer parâmetro.</p>

Anexo 5: Descrição detalhada dos blocos de simulação